

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Волкова А. Ю., Пушкин М. С.

Руководитель - профессор, д.ф.-м.н. Гринберг Б. А.

УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург,

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург,

Alyonka_wolf@mail.ru

limon.5ddd@yandex.ru

При всем многообразии материалов и режимов сварки поверхность раздела никогда не является гладкой, а содержит неоднородности, независимо от того, является ли она плоской или волнообразной. Два процесса – образование выступов и образование зон локального расплавления – определяют структуру поверхности раздела. Образование выступов не зависит от того, имеют ли свариваемые металлы взаимную растворимость. Но от этого зависит строение зон локального расплавления. При наличии взаимной растворимости это истинные растворы; в отсутствии взаимной растворимости - коллоидные растворы.

Если бы поверхность раздела была гладкой, то возникали бы проблемы со сцеплением, и требовались бы либо реконструкция металлических связей, либо транспорт точечных дефектов. Но наличие выступов решает эту проблему: выступы играют при этом роль "клиньев", связывая контактирующие материалы между собой. Трение на поверхности выступа, усиленное за счет того, что сам выступ не является гладким, а содержит выступы следующих порядков, содействует сцеплению поверхностей.

Выступы возникают в результате бездиффузионных выбросов более тугоплавкого (и обычно более твердого) металла. Образование выступов представляет собой типичный стохастический процесс. Учитывая такой характер процесса, а также результаты многочисленных электронно-микроскопических наблюдений, предлагается использовать фрактальный подход для описания поверхности раздела. Трудно ожидать, чтобы возникшие случайным образом выступы представляли бы собой идеальные фракталы. Они явно отличаются от них неполнотой и неточностью повторений структуры. Тем не менее, подобные объекты можно считать фракталами при выполнении хотя бы одного из следующих условий: они обладают нетривиальной структурой на всех масштабах и увеличение масштаба не ведет к упрощению структуры; они являются самоподобными или приближённо самоподобными; они обладают дробной метрической размерностью.

Для соединения Cu-Ta с плоской границей проведены расчеты фрактальной размерности островов, которые являются продольными сечениями поверхности раздела.

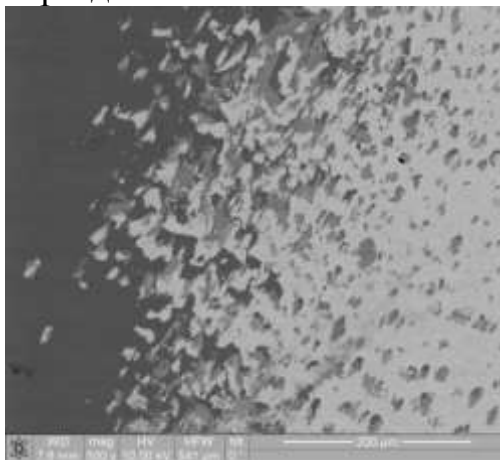


Рис. 1. Cu-Ta, плоская граница, продольное сечение; белый цвет - тантал, чёрный - медь, серый - зоны расплавления

На рис. 1 видны чередующиеся области (острова), имеющие разный состав (показаны разным цветом). Если бы не было выступов, то на продольных сечениях выше границы раздела наблюдался бы один металл, а ниже – другой, так что СЭМ изображения были бы одноцветными. При наличии выступов в результате их пересечения плоскостью продольного сечения наблюдались бы одновременно области, содержащие разные металлы, так что изображение было бы двухцветным. Однако, на рис. 1 наблюдаются не две, а три области. Как показало исследование их внутренней структуры, две из них заполнены исходными металлами (практически без изменения состава), а третья – смесью металлов. Поэтому СЭМ изображения продольного сечения являются трехцветными, причем серая зоны соответствует расплавленной области, содержащей смесь металлов. В результате поверхность раздела представляет собой хаотический рельеф с большим числом выступов и впадин. Для соединения Cu-Ta из-за высокой температуры плавления тантала (3300 К) возникает коллоидный раствор, который представляет собой расплав меди, содержащий частицы не испытывавшего расплавления тантала. При последующем затвердевании коллоидный раствор становится застывшей дисперсионно упрочненной суспензией.

Мы полагаем, что острова являются фрактальными объектами. Для расчета фрактальной размерности преобразуем изображение поверхности на рис. 1 следующим образом: либо оставим острова тантала (белый цвет) на черном фоне (рис. 2а), либо оставим зоны локального расплавления (серый цвет) на черном фоне (рис. 2б). Проведём расчёты размерности островов посредством методов, используемых в теории фракталов [1].

Вначале рассматривается совокупность островов, изображенных на рис. 2а.

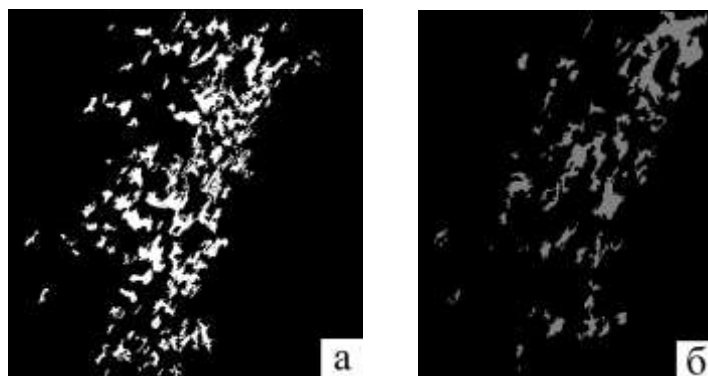


Рис.2. Острова на черном фоне: (а) - острова тантала; (б) - зоны локального расплавления

Для каждого острова вычисляется площадь A и периметр L . На рис. 3 приведена зависимость $\log A$ от $\log L$, которая может быть аппроксимирована прямой линией. В данном случае каждый остров является одной точкой.

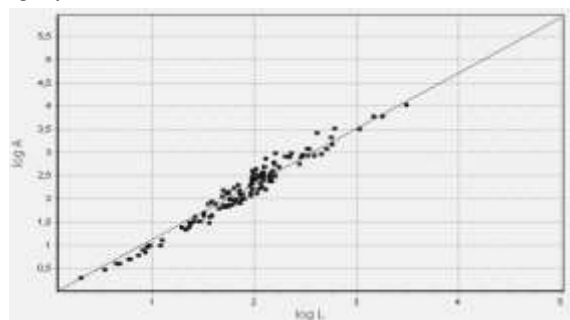


Рис.3. Зависимость площадь-периметр для островов тантала

Из теории фракталов [1] известно соотношение периметра и площади для подобных островов: $A \propto L^D$, где D – фрактальная размерность. Отсюда $\log(A) \propto D \log(L)$. Зная тангенс угла наклона, вычисляем величину D . Для зависимости, приведенной на рис. 3, тангенс угла наклона равен примерно 1.19. Соответственно для островов тантала $D=1,68$. Аналогичным образом получаем, что для зон локального расплавления $D=1,58$. Подобная зависимость наблюдается также и для совокупности островов при других продольных сечениях, а также при других увеличениях. Полученные результаты являются, в известной мере, обоснованием фрактального подхода, который для описания рельефа поверхности сварного соединения впервые предложен авторами доклада.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов УрО РАН № 12-У-2-1011, 13-2-014-УТ.

1. Федер Е. Фракталы. М.: Мир. 1991. 258 с.